



ISSN 2340-5457

Volumen IV, Nº 1 (enero de 2015)

<http://www.monfragueresiliente.com/>

**EROSIÓN HÍDRICA Y MODIFICACIÓN DEL CAUDAL DE INUNDACIÓN EN
AMBIENTES MEDITERRÁNEOS. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA**

**Antonio Gallegos Reina,¹
María Jesús Perles Roselló¹**

Revista Científica Monfragüe Resiliente. <http://www.monfragueresiliente.com/>

Editada en Cáceres, Dpto. Arte y Ciencias del Territorio de la Universidad de Extremadura.
Elaborada conjuntamente con las Universidades de Lisboa y la Autónoma de México.

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. CP 29071. Málaga.
a.gallegos@uma.e



RESUMEN

El objetivo de esta aproximación metodológica es la evaluación e incorporación de la carga sólida por erosión hídrica a la modelización hidráulica, considerando de manera asociada el comportamiento de ambas peligrosidades. La cuantificación de la producción de sedimentos se realiza mediante aplicación de la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelos (M.U.S.L.E.), que al trabajar con un evento pluviométrico concreto, equiparable al periodo de retorno considerado en el modelo hidrológico, permite alcanzar una adecuada correlación metodológica con el estudio de inundabilidad. Con esta modificación de la modelización hidrológico-hidráulica se logra un mejor ajuste a los esquemas hidráulicos característicos de las cuencas fluviales mediterráneas, donde la pérdida de suelos y el aporte de sedimentos al flujo se convierte en un condicionante muy notable en buena parte de los episodios de inundación.

Palabras clave: erosión hídrica; sedimentos; inundación; cuencas fluviales mediterráneas; peligrosidad asociada.

Abstract

The aim of this methodological approach is the evaluation and incorporation of sediment load by water erosion in hydraulic modeling, considering the behavior of both associated hazards. Sediment output is calculated by applying the Modified Universal Soil Loss Equation (M.U.S.L.E.), which working with a particular rainfall event, comparable to the return period considered in the hydrological model, achieves an adequate methodological correlation with the study of flooding. This modification of the hydrological and hydraulic modeling achieve a better fit to the characteristic flow pattern of Mediterranean river basins, where soil loss and sediment flow becomes are a determining factor in most of the flood episodes.

Keywords: water erosion; sediments; flood; Mediterranean basins; associated hazards.



1. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes condicionantes de las cuencas fluviales del litoral mediterráneo es la alta capacidad de erosión hídrica y la producción de sedimentos sólidos resultante. La erosión potencial de suelos, más allá de ser un riesgo en sí mismo, es también un importante condicionante de la peligrosidad de inundación.

Los sedimentos sólidos que viajan en flotación tienen gran potencial para obstruir o represar la corriente, generando picos de crecida y atoros en obras de paso e infraestructuras. A pesar de ello, la interrelación agua-sedimento solo se tiene en consideración muy ocasionalmente, y esto es una limitación importante en el ámbito especial considerado, pues en la dinámica torrencial mediterránea no es infrecuente que se lleguen a producir flujos hiperconcentrados (Gallegos, 2013).

En este trabajo se presenta una aproximación metodológica a la problemática, que pretende integrar ambas peligrosidades, mediante el cálculo de la producción de sedimentos sólidos por erosión y su conversión a parámetros volumétricos incorporables a la modelización hidráulica junto con el caudal resultante del estudio hidrológico.

2. EROSIÓN HÍDRICA E INUNDACIONES EN AMBIENTES MEDITERRÁNEOS

La erosión potencial de suelos está regulada por una serie de variables frecuentes en las cuencas fluviales mediterráneas, como son la elevada torrencialidad de las precipitaciones, la ausencia de cubierta vegetal, la coincidencia de las lluvias de mayor intensidad horaria y la estación seca, la elevada pendiente media de las cuencas, el escaso desarrollo edafológico, la alta recurrencia de incendios forestales, el abandono de parcelas agrícolas tradicionales o el alto porcentaje de suelo urbanizable no consolidado, con frecuentes movimientos de tierra, excavaciones, rellenos, encauzamientos o superficies asfaltadas. Y entre las consecuencias cabe destacar las relacionadas con la capacidad erosiva del flujo, como la pérdida de terrenos productivos, la socavación de infraestructuras o los procesos de inestabilidad de laderas; y las relacionadas con la carga sólida arrastrada por el agua, como la reducción de la sección hidráulica del cauce, el colapso y aterramiento de infraestructuras, la formación de presas naturales o la disminución de la velocidad del flujo y el consecuente incremento de la lámina de inundación.

Se trata, por tanto, de una peligrosidad con gran incidencia sobre la magnitud de las avenidas y su potencialidad catastrófica, que además responde a procesos de retroalimentación (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

3. MODIFICACIÓN DEL CAUDAL DE INUNDACIÓN POR INCORPORACIÓN DE SÓLIDOS PROVENIENTES DE LA EROSIÓN HÍDRICA. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

La modificación del caudal de inundación con los sólidos provenientes de la erosión hídrica se realizará en base a la erosión potencial, que aunque obtenida por métodos indirectos, ofrece resultados aceptablemente similares a los obtenidos mediante métodos directos (Bodoque, 2007).



En esta propuesta metodológica se aplicará el algoritmo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (M.U.S.L.E.), resultando un valor de toneladas de suelo perdidas para una cuenca y evento pluviométrico concreto, que será el mismo usado en el periodo de retorno con el que se esté realizando el estudio hidrológico-hidráulico.

Aunque existen otros modelos para el cálculo del aporte de sedimentos en cuencas, como el de Meyer-Peter, Guy-Norman o Fournier (Senciales, 1999), se ha considerado la M.U.S.L.E. como el más apropiado por su uso extendido y normalizado, además de su utilidad en cuencas pequeñas como las que caracterizan el litoral mediterráneo. De hecho, la M.U.S.L.E. surgió como extensión del modelo U.S.L.E. a pequeñas cuencas hidrográficas, con el objetivo de predecir en éstas los sedimentos aportados para un aguacero concreto (Robredo, 1993).

El resultado obtenido permitirá cuantificar la cantidad de sedimentos, en peso, que se han producido en cada subcuenca. No obstante, para su incorporación a la lámina de inundación será precisa su transformación a volumen, pudiendo ser asimilable de tal modo al volumen de escorrentía que ha producido la precipitación neta durante el evento pluviométrico.

Para ello es necesario previamente conocer la densidad relativa de las partículas minerales sedimentarias con respecto a la del flujo de inundación. Dada la gran variabilidad de este tipo de partículas y densidades derivadas, se ha estimado en primer lugar la tipología mineralógica más frecuente en los cauces mediterráneos, en base al estudio de variación granulométrica y mineralógica de sedimentos retenidos por diques en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular, de Conesa y otros (Conesa *et al.*, 2009). Por orden de representación porcentual resultan las siguientes partículas minerales: cuarzo, moscovita, dolomita y calcita. Posteriormente, atendiendo a las características de las partículas sedimentarias, y en particular a su densidad relativa frente al agua, se derivan los siguientes valores (Maza, 1987):

Tabla 1. Densidades relativas de determinadas partículas minerales. Elaboración propia a partir de Maza (1987).

Partícula mineral	Densidad relativa de las partículas minerales sedimentarias frente al agua		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Cuarzo	2.60	2.70	2.65
Moscovita	2.76	3.10	2.93
Dolomita	2.85		2.85
Calcita	2.72		2.72

De aquí se extrae una densidad relativa media de 2,79. Considerando como referencia la densidad del agua (1.000 kg/m³), se estimará una densidad media para los sedimentos de 2.790 kg/m³. Así, el valor alcanzado con la formulación de la M.U.S.L.E. será dividido por dicha cantidad para conocer el volumen total, en metros cúbicos, que llegaría a alcanzar el arrastre de las partículas sedimentarias.

Una vez obtenido el volumen de sedimentos que se produciría en el periodo de retorno estudiado, su incorporación se realiza mediante comparación porcentual entre el volumen de sedimentos y el volumen de escorrentía total. Este último valor ya ha sido calculado previamente, al ser uno de los factores que componen el algoritmo M.U.S.L.E. Manteniendo tal relación, se incrementará el caudal instantáneo máximo resultante del estudio hidrológico para su incorporación en la modelización hidráulica.

4. RESULTADOS

4.1. Área de estudio

La cuenca del arroyo de los Jaboneros, con una superficie de 29,9 km², se localiza en el tercio oriental del término municipal de Málaga, al noreste de la ciudad, en una zona de media montaña, de origen metamórfico. Sus principales características son la presencia destacada del relieve calizo del Monte San Antón y de barriadas residenciales periurbanas en la cuenca media-baja, y el núcleo urbano de Málaga en la desembocadura. No obstante de su desarrollo urbanístico, cuenta con significativas limitaciones a este desarrollo por su geología y la presencia destacada de diversas peligrosidades naturales.

El régimen pluviométrico se caracteriza, como en buena parte del litoral mediterráneo, por una acusada y prolongada sequía estival a la que le siguen lluvias de carácter torrencial en primavera y otoño, conformando con todo ello un escenario propicio para que concurren avenidas o inundaciones.

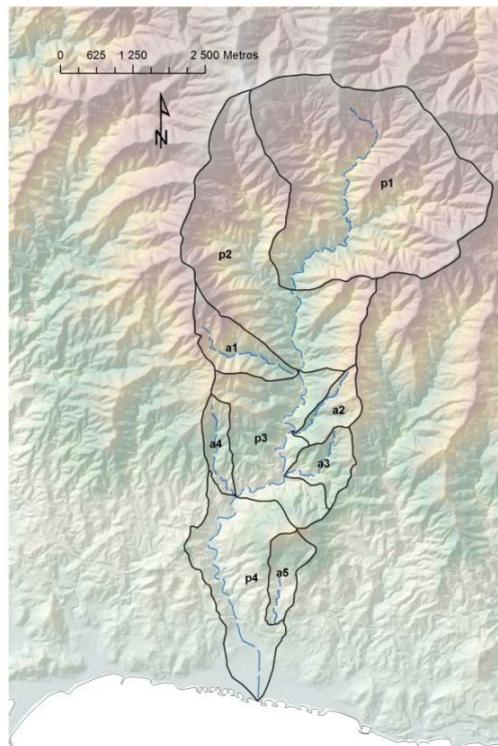


Fig. 1. Cuenca del arroyo de los Jaboneros. Esquema de subcuencas.

4.2. Producción de sedimentos e incremento del flujo de inundación y su peligrosidad

Para la realización de los estudios hidrológicos y sedimentarios, la cuenca se ha subdividido en 9 subcuencas, conformadas por 5 afluentes y 4 puntos de caudal para la cuenca principal (ver Ilustración 1). El cálculo de producción de sedimentos por erosión de suelos se ha realizado para un periodo de retorno de 500 años, lo que equivale a una precipitación máxima diaria de 247.6 l/m² según la publicación del Ministerio de Fomento “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” (Ministerio de Fomento, 1999) y en base a los siguientes datos morfométricos e hidrológicos (Tabla 2):

Tabla 2. Datos morfométricos e hidrológicos para obtener el caudal máximo instantáneo en cada subcuenca.

	Cuenca principal				Afl. 1	Afl. 2	Afl. 3	Afl. 4	Afl. 5
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 1	PC 1	PC 1	PC 1	PC 1
Precipitación total diaria (l/m ²)	249.81	249.50	248.53	247.59	248.45	244.58	242.98	247.11	241.95
Superficie (km ²)	11.08	18.4	24.76	29.98	1.26	0.74	0.88	0.68	0.85
Longitud cauce (km)	4 927	6 602	10 350	14 944	2 301	1 760	1 678	2 013	1 827
Diferencia cota cabecera – cota intersección (km)	0.73	0.78	0.99	1.02	0.53	0.39	0.3	0.39	0.42
Pendiente media (%)	14.82	11.81	9.57	6.83	23.03	22.16	17.88	19.37	22.99
Tiempo de concentración (horas)	1.45	1.89	2.77	3.9	0.75	0.61	0.62	0.7	0.63
Intensidad media de la precipitación correspondiente al Tc (mm/h)	75.92	64.96	51.38	41.32	109.05	119.89	118.05	112.62	116.59
Umbral de escorrentía Po (l/m ²)	41.78	53.52	58.24	55.67	112.97	84.62	70.61	63.7	37.95
Coeficiente de escorrentía	0.5	0.41	0.38	0.4	0.17	0.25	0.31	0.35	0.52
CAUDAL (m³/s)	154.51	185.68	193.91	211.64	8.16	7.67	11.14	9.33	17.84

Con tales datos, y tras la aplicación de la M.U.S.L.E., se obtiene una producción total de residuos sedimentarios de 2.155.930 toneladas, lo que supone que cada metro cúbico del flujo transporta una carga sedimentaria de 441 kilogramos. Con la transformación a volumen resulta un porcentaje de sedimentos en el flujo del 15,8%.

Esta información, detallada para cada una de las subcuencas o puntos de caudal considerados, se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3. Producción de sedimentos en las subcuencas, según M.U.S.L.E., y relación porcentual con el volumen total escurrido en el evento pluviométrico considerado.

	Cuenca principal				Afl. 1	Afl. 2	Afl. 3	Afl. 4	Afl. 5
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 1	PC 1	PC 1	PC 1	PC 1
Volumen total escurrido (m ³) para el evento considerado	2 017 894	3 077 612	3 984 708	4 886 686	140 286	96 937	125 696	104 485	152 767
Producción de sedimentos por erosión de suelos (toneladas)	939 830	1 259 460	1 551 353	2 155 930	14 959	36 657	57 360	44 306	62 300
Producción media de sedimentos, en toneladas por hectárea	848	684	627	719	119	495	652	652	733
Sedimentos en el flujo (kg/m ³)	465.7	409.2	389.3	441.2	106.6	378.2	456.3	424.0	407.8
Producción de sedimentos, en volumen (m ³)	336 856	451 419	556 040	772 735	5 362	13 139	20 559	15 880	22 330
% de sedimentos en el flujo	16.7	14.7	14.0	15.8	3.8	13.6	16.4	15.2	14.6

Habiéndose realizado a continuación el estudio hidráulico con el caudal original del estudio hidrológico y con el caudal modificado tras la incorporación volumétrica de los residuos sólidos por erosión de suelos, se han obtenido diferencias sensibles (ver Tabla 4). La elevación media relativa del flujo de inundación en las secciones de control asciende desde 1,37 a 1,47 metros, la anchura media de la lámina inundable pasa de 24,5 a 25,4 metros, y el perímetro mojado² crece desde los 22,1 a los 24,4 m². También se incrementan otros valores, como la tensión cortante del flujo, responsable de una mayor peligrosidad del agua y de generar procesos de retroalimentación por erosión de orillas, en más de 10 newton por m². Si bien estos incrementos de los valores medios no reflejan un cambio demasiado notable, cabe destacar que su distribución no es homogénea, y que es precisamente en las

secciones próximas a la desembocadura, en las que habitualmente suele localizarse la mayor vulnerabilidad de los ríos y arroyos mediterráneos por coincidir con los asentamientos litorales, donde se producen las mayores diferencias.

Tabla 4. Variación de aspectos hidráulicos del flujo tras el incremento del caudal de escorrentía (valores medios por subcuenca).

	Cuenca principal				Afl. 1	Afl. 2	Afl. 3	Afl. 4	Afl. 5
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 1				
Caudal original (PR500)	154.51	185.68	193.91	211.64	8.16	7.67	11.14	9.33	17.84
% sedimentos (PR500)	16.7	14.7	14.0	15.8	3.8	13.6	16.4	15.2	14.6
Caudal modificado (PR500)	180.30	212.92	220.97	245.11	8.47	8.71	12.96	10.75	20.45
Elevación relativa del caudal (incremento porcentual, %)		6.8	6.4	7.1	1.9	7.0	7.0	7.1	7.4
Perímetro mojado (incremento porcentual, %)		9.6	9.6	10.7	2.6	9.8	10.4	14.3	10.9
Anchura sección inundable (incremento porcentual, %)		3.0	3.2	3.1	0.9	3.3	3.6	10.1	5.0
Tensión cortante del flujo (incremento porcentual, %)		6.7	4.1	4.1	1.6	0.6	6.5	-3.0	1.3

En cualquier caso, y más allá de lo anterior, debe tenerse presente que estos parámetros solo responden al incremento del flujo con un volumen determinado de caudal asimilado al agua, lo que deja fuera algunos otros aspectos directamente relacionados con la peligrosidad. Tales aspectos son la densidad, el decremento de la velocidad y consecuente aumento del perímetro mojado, el aumento de la tensión cortante, o directamente la peligrosidad del flujo sobre bienes y personas por arrastre de partículas y elementos sólidos.

Estos otros condicionantes deben recogerse, si ya no cuantitativamente, sí al menos cualitativamente. Puede hacerse mediante la representación cartográfica del porcentaje de carga sedimentaria del flujo, estableciéndose paralelamente unos intervalos de peligrosidad en función de dicha relación agua/sólidos. Esta cartografía ya fue incorporada en la propuesta normalizada de mapas de peligrosidad del proyecto PRIGEO con la denominación de “rangos de porcentaje de carga sólida respecto al caudal total” (Díez Herrero *et al.*, 2008), y permitiría al técnico que lo evalúe tener en cuenta la peligrosidad del flujo.



Fig. 2. Fotografía del arroyo de los Jaboneros, en uno de los puentes próximos a su desembocadura, tras un evento tormentoso, el 7 de Enero de 2010. Apréciase que el flujo es barro líquido. Foto: Diario Sur.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La peligrosidad asociada, especialmente en relación al aporte y transporte de sedimentos en el flujo, viene despertando interés en los últimos años, tanto desde un punto de vista técnico como científico. En este último campo, los autores Perles, Gallegos y Cantarero (Perles *et al.*, 2006, 2006ii) han trabajado en diversas propuestas de peligrosidad acumulada que toman la lámina de inundación como flujo o vector de materia y energía. En tales trabajos se vehiculan las peligrosidades asociadas aumentando el caudal de inundación en base a unos porcentajes que reflejan el incremento de la peligrosidad según el área afectada en la cuenca por cada una de dichas peligrosidades. La propuesta que aquí se presenta mantiene el concepto de la inundación como vector de materia de las distintas peligrosidades asociadas, pero ha precisado su incorporación al flujo mediante la cuantificación de los sólidos generados en la principal de dichas peligrosidades: la erosión hídrica. Como resultado se obtiene una nueva lámina de inundación que tiene en consideración dichos sólidos y una gradación de la peligrosidad del flujo en función del porcentaje de estos respecto al caudal limpio. Esta gradación recoge el incremento de peligrosidad de la lámina por aumento de densidad del flujo, impacto de la carga en infraestructuras, potenciales lesiones a personas, y sobre elevación de la lámina de agua (Díez Herrero *et al.*, 2008).

Al trabajar el algoritmo M.U.S.L.E con un evento pluviométrico concreto que puede hacerse coincidir con el evaluado en el estudio hidrológico, se logra una adecuada correlación metodológica con el estudio hidrológico-hidráulico. La incorporación volumétrica de los residuos sedimentarios junto con el resultado del estudio hidrológico permite una mejor aproximación del estudio hidráulico a la lámina real de inundación. El área inundable obtenida en la aplicación práctica que aquí se presenta logra aproximarse con mayor exactitud a la extensión real de la lámina inundable del arroyo de los Jaboneros en eventos históricos en la cuenca.

Junto a ello, la valoración cualitativa de la peligrosidad en base al porcentaje de residuos sólidos sedimentarios en el flujo de inundación permite alcanzar una idea más aproximada de la peligrosidad real asociada a la inundación.

Entre las abstracciones metodológicas que ha sido necesario plantearse cabe destacar la necesidad de elegir entre la incorporación total o parcial al flujo de inundación de los sedimentos generados por la erosión de suelos, así como su decantación o no durante el transporte fluvial. Los modelos existentes para evaluar esta tasa de incorporación y transporte varían desde formulaciones de cierta complejidad hasta simples factores de proporción de desplazamiento en función de la superficie de drenaje (García, 2013; Linares *et al.*, 2009; Batalla, 2013). Finalmente se ha optado por la primera opción. Con ello se maneja la hipótesis de máximo riesgo, estando del lado de la seguridad y evitando posibles subestimaciones de la peligrosidad en variables y modelizaciones donde no deja de existir cierta incertidumbre. De igual modo, las características propias de las cuencas mediterráneas se orientan todas a que el porcentaje de erosión arrastrado hasta el cauce sea muy próximo al 100%. Esto es: aguaceros intensos, altas pendientes, cuencas de pequeña superficie, escasa vegetación o normal ausencia de llanuras de sedimentación. Y en relación al transporte, siguiendo a Mintegui y Robredo (1993), para cuencas torrenciales o de pendiente acusada es posible admitir el valor de salida de sedimentos igual al volumen total aportado por cada unidad hidrológica, al predominar los flujos turbulentos, con alta competencia y velocidad.

BIBLIOGRAFÍA

GALLEGOS REINA, A. (2013): 'Cuantificación y distribución cartográfica de la generación de escorrentía y sedimentos en la provincia de Málaga'. *Baética*, 35: 57-74.

DÍEZ HERRERO, A.; LAIN HUERTA, L.; LLORENTE ISIDRO, M. (Ed.) (2008): 'Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración'. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

AYALA-CARCEDO, F.J.; OLCINA CANTOS, J. (Coord.) (2002): 'Riesgos naturales'. Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, 1512 págs., Barcelona.

BODOQUE DEL POZO, J.M. (2007): 'Ensayos metodológicos para la cuantificación de procesos geomorfológicos activos asociados a la hidrología de superficie en la sierra de Guadarrama y Gredos'. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Geológicas. Departamento de Geodinámica. Dirección: Andrés Díez Herrero y José Francisco Martín Duque. Madrid.

SENCIALES GONZÁLEZ, J.M. (1999): 'Redes fluviales. Morfología de análisis'. Universidad de Málaga. Estudios y ensayos.

ROBREDO SÁNCHEZ, J.C. (1993): 'Erosión'. E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

CONESA GARCÍA, C.; ARANA CASTILLO, R.; GARCÍA LORENZO, R. (2009): 'Variación granulométrica y mineralógica en profundidad de los sedimentos retenidos por diques. Estudio en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular'. *Nimbus*, nº23-24. 61-88.

MAZA, J.A. (1987): 'Introduction to River Engineering'. División de Estudios de Postgrado. Facultad de Ingeniería UNAM.

MINISTERIO DE FOMENTO (1999): 'Máximas lluvias diarias en la España peninsular'. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transporte. Dirección general de carreteras.

PERLES ROSELLÓ, M.J.; GALLEGOS REINA, A.; CANTARERO PRADOS, F. (2006): 'Análisis del ajuste del área inundable obtenida mediante una evaluación integrada de la peligrosidad de inundación y peligros asociados'. *Baética. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 28, 527-545.

PERLES ROSELLÓ, M.J.; CANTARERO PRADOS, F.; GALACHO JIMÉNEZ, F.B.; GALLEGOS REINA, A.; VÍAS MARTINEZ, J.M. (2006): 'Propuesta metodológica para el análisis integrado de peligros asociados. Aplicación al peligro de inundación, movimientos gravitacionales y erosión hídrica'. *Actas del XII Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica*, Granada.

GARCÍA GARCÍA, R. (2013): 'Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas'. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela de Caminos, Canales y Puertos.

LINARES, G. *ET AL.* (2009): 'Parametrización de modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos en parcelas agrícolas ubicadas en la cuenca del río Chirgua (Venezuela)'. Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Salta, Argentina.



BATALLA CAMARGO, G. (2013): 'Efecto del cambio de uso de suelo en el aporte de sedimentos hacia la presa Jalpán (Sierra Gorda Querétaro)'. Tesis Doctoral. Universidad autónoma de Querétaro (México).

MINTEGUI, J.A.; ROBREDO, J.C. (1993): 'Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica.'. Escuela Superior de Ingenieros de Montes. Fundación CONce del Valle de Salazar. 88 pp.

